

УДК 629.3

У.Ш. Вахидов¹, Ю.И. Молев¹, М.Г. Черевастов,² А.В.Согин¹, А.С. Слюсарев³**ПРЯМЫЕ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА РЕАКЦИИ ДВИЖЕНИЯ АВТОМОБИЛЯ
НА СТУПЕНЧАТОЕ УПРАВЛЯЮЩЕЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
Нижегородский государственный педагогический университет им. К. Минина²,
Волжский государственный университет водного транспорта (Нижний Новгород)³

Рассмотрена переходная реакция автомобиля модели ГАЗ 3302 при ступенчатом управляющем воздействии на рулевое управление. Автомобиль представлен одномассовой плоской расчетной моделью. Уравнения движения машины записаны в форме производных устойчивости. Исследованы условия наступления различных законов протекания переходной реакции. Произведен расчет прямых оценок качества переходного процесса по угловой скорости автомобиля при скачкообразном (ступенчатом) управляющем воздействии. В заключение работы сделаны выводы о влиянии различных конструктивных параметров автомобиля на показатели качества переходной реакции.

Ключевые слова: управляемость автомобиля, показатели качества переходного процесса.

В работе [3] был приведен теоретический расчет переходной реакции движения автомобиля при заданной функции возмущения. Автомобиль же при этом был представлен одномассовой плоской расчетной моделью, обладающей своими преимуществами и недостатками, а в качестве функции возмущения применялась удобная в математическом плане скачкообразная функция, уравнения движения колесной машины были записаны в форме производных устойчивости. Теперь, на следующем шаге, зная аналитическую зависимость переходной реакции движения автомобиля, на примере конкретной модели транспортного средства, произведем прямые оценки качества данной реакции (переходного процесса) по угловой скорости поворота машины. Так же, как и ранее, нами будут учитываться только возмущения от управления, аэродинамическими возмущениями и воздействиями дороги мы пренебрегаем. Поступательная скорость автомобиля считается постоянной. На основании прямых оценок качества переходного процесса, при различных условиях, будут сделаны теоретические выводы о влиянии на качество переходной реакции автомобиля по угловой скорости поворота, положения его центра тяжести, величины поступательной скорости и угла поворота управляемых колес.

В настоящей статье приняты следующие обозначения:

a – расстояние от центра тяжести автомобиля до передней оси [м];

b – расстояние от центра тяжести автомобиля до задней оси [м];

θ – угол поворота управляемых колес [рад];

ω – угловая скорость поворота автомобиля [1/с];

s – оператор Лапласа;

C_1 – коэффициент сопротивления уводу шин передних колес [Н/рад];

C_2 – коэффициент сопротивления уводу шин задних колес [Н/рад];

J_z – момент инерции автомобиля, относительно вертикальной оси, проходящей через его центр тяжести [кг·м²];

M – масса автомобиля [кг];

V – поступательная скорость автомобиля [м/с].

Производные устойчивости:

$Y_{\beta} = C_1 + C_2$ - коэффициент боковой силы, вызванной наличием увода колес автомобиля [Н/рад];

$Y_{\omega} = \frac{1}{V}(aC_1 - bC_2)$ - коэффициент боковой силы, вызванной поворотом автомобиля, относительно вертикальной оси, проходящей через его центр тяжести [Н·с];

$Y_{\theta} = -C_1$ - коэффициент боковой силы, вызванной поворотом управляемых колес [Н/рад];

$N_{\beta} = aC_1 - bC_2$ - коэффициент поворачивающего момента, вызванного наличием увода колес автомобиля [(Н·м)/рад];

$N_{\omega} = \frac{1}{V}(a^2C_1 + b^2C_2)$ - коэффициент поворачивающего момента, вызванного поворотом автомобиля, относительно вертикальной оси, проходящей через его центр тяжести [Н·м·с];

$N_{\theta} = -aC_1$ - коэффициент поворачивающего момента, вызванного поворотом управляемых колес [(Н·м)/рад].

На подготовительном этапе, вначале, определимся с моделью автомобиля и сформируем начальные условия для дальнейшего исследования. Нами, в дальнейшем, будут использованы технические характеристики ГАЗ 3302 [4], как широко применяемого в нашей стране коммерческого автомобиля, с передними управляемыми и задними ведущими колесами. Основные характеристики сведем в табл. 1.

Таблица 1

Общие технические характеристики модели ГАЗ 3302

Колесная база	2,9 метра
Шины	Пневматические, радиальные, размером 175R16С
Полная масса/Снаряженная масса	3500 кг/1850 кг
Распределение снаряженной массы (передняя ось $[M_1]$ /задняя ось $[M_2]$)	1050 кг/800 кг
Распределение полной массы (передняя ось $[M_1]$ /задняя ось $[M_2]$)	1200 кг/ 2300 кг

На рис. 1 схематически изображен ГАЗ 3302 с отмеченными основными геометрическими конструктивными размерами машины.

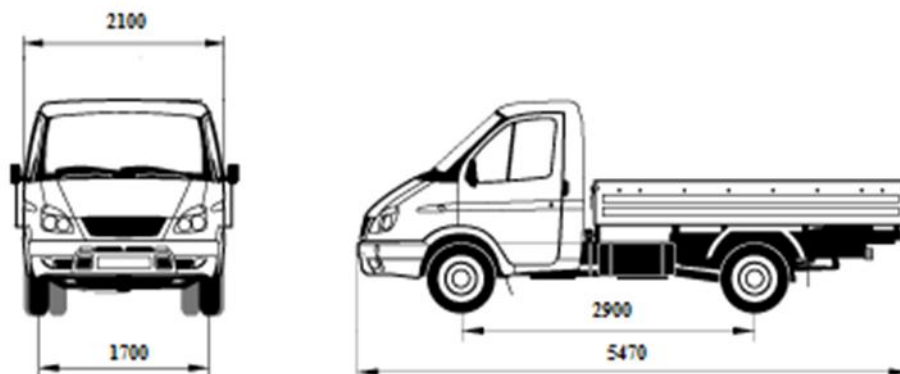


Рис. 1. Схематический внешний вид ГАЗ 3302

Далее подсчитаем величину коэффициента сопротивления уводу одной шины, используя уже известную формулу, применяемую в [2], за тем лишь исключением, что полученное значение нужно взять с противоположным знаком, из-за особенности выбора координатных осей, о чем отмечено в публикации [3]:

$$C = -780B_{\kappa} (d + 2B_{\kappa})(p_{\text{ш}} + 98). \quad (1)$$

Для нашего случая $B_{\kappa}=0,178$ м, $d=0,4$ м и $p_{\text{ш}}=280$ кПа [4]. После подстановки величин в выражение (1), получим:

$$C \approx -40 \left[\frac{\text{кН}}{\text{рад}} \right].$$

Имея величину коэффициента сопротивления уводу одной шины, принимая во внимание, что все колеса снабжены одинаковыми шинами с идентичными параметрами, получим для осей:

$$C_1 = 2C = -80 \left[\frac{\text{кН}}{\text{рад}} \right]; C_2 = 4C = -160 \left[\frac{\text{кН}}{\text{рад}} \right].$$

Диапазон изменения массы автомобиля, с учетом технической документации, для нашей работы составляет от 1 850 (снаряженная масса) до 3 500 кг (полная масса). При этом необходимые подсчеты будут произведены на краях диапазона и для массы автомашины 2 500 кг и 3 000 кг. Неизменная поступательная скорость автомобиля должна варьироваться в интервале от 0 до 32 м/с, а угол поворота управляемых колес составит $0 \dots 15^\circ$. Соответствующие значения положения центра тяжести и момента инерции автомобиля при его определенной массе сведены в табл. 2. Расчет величин a и b здесь не приводится, но для их получения был применен способ, описанный в работе [2]. Также следует отметить, что значения J_z были рассчитаны на основании данных о массе отдельных элементов ГАЗ 3302 с учетом массы груза и их удаления от положения центра тяжести машины.

Таблица 2

Отдельные значения параметров ГАЗ 3302

Масса автомобиля (М), кг	Положение центра тяжести автомобиля		Момент инерции ав- томобиля (J_z), кг·м ²
	a , м	b , м	
1850	1,256	1,644	4012
2500	1,659	1,241	5140
3000	1,85	1,05	5895
3500	1,91	0,99	6533

Кратко напомним, что в качестве возмущения от управления, как и в предыдущей работе, мы применяем скачкообразную функцию, заданную следующим образом:

$$\theta(t) = \begin{cases} 0, & t < 0, \\ \theta_{yc}, & t > 0, \end{cases} \quad (2)$$

т.е. значение угла поворота управляемых колес в момент времени $t = 0$ мгновенно изменяется с нулевого значения до нового, установившегося θ_{yc} .

Графическое изображение функции возмущения (2) представлено на рис. 2.



Рис. 2. Скачкообразная (ступенчатая) возмущающая функция

Прежде чем переходить к непосредственному изучению переходной реакции автомобиля, исследуем его характеристическое уравнение.

Составим характеристическое уравнение автомобиля ГАЗ 3302 и найдем его корни. Используя материалы работы [3], имеем:

$$s^2 + B_1s + B_2 = 0, \quad (3)$$

$$\text{где } B_1 = -\left(\frac{N_\omega}{J_z} + \frac{Y_\beta}{MV}\right); \quad B_2 = \frac{N_\beta}{J_z} - \frac{N_\beta Y_\omega}{MVJ_z} + \frac{Y_\beta N_\omega}{MVJ_z}.$$

В зависимости от соотношения величин B_1 и B_2 корни уравнения (3) s_1 и s_2 могут иметь как действительные значения, так и мнимые. При этом переходная реакция по угловой скорости поворота автомобиля будет изменяться либо по экспоненциальному закону, либо иметь колебательный характер. Граничной точкой перехода от одного вида к другому, очевидно, будет равенство $B_1^2 - 4B_2 = 0$. Далее раскроем это равенство с учетом определения производных устойчивости и разрешим его относительно поступательной скорости автомобиля V_0 , при условии, что положение его центра тяжести, а также масса и момент инерции остаются постоянными. Получим:

$$V_0 = \sqrt{\frac{R_1^2 - 4R_3}{4R_2}}, \quad (4)$$

$$\text{где } R_1 = -\frac{(a^2C_1 + b^2C_2)M + (C_1 + C_2)J_z}{MJ_z}; \quad R_2 = \frac{aC_1 - bC_2}{J_z}; \quad R_3 = \frac{(a+b)^2C_1C_2}{MJ_z}.$$

На основе формулы (4), можно сделать вывод о том, что если выполняется условие $V > V_0$, то переходная реакция будет протекать по гармоническому закону, если наоборот, то по экспоненциальному. Также, обращая внимание на выражения, описывающие B_1 и B_2 , необходимо отметить, что данные коэффициенты не зависят от величины угла поворота управляемых колес и, следовательно, сам по себе этот угол не оказывает влияние на закон протекания переходной реакции автомобиля.

Рассмотрим случай, когда выполняется условие, что $0 < V < V_0$, т.е. переходная реакция имеет аperiодический монотонный характер и протекает по экспоненциальному закону, тогда выполняется равенство:

$$\omega(t) = E_1 + E_2e^{s_1t} + E_3e^{s_2t}, \quad (5)$$

$$\text{где } A_1 = \frac{N_\theta \theta_{yc}}{J_z}; \quad A_2 = \frac{\theta_{yc}(Y_\theta N_\beta - N_\theta Y_\beta)}{MVJ_z};$$

$$s_{1,2} = \frac{-B_1 \pm \sqrt{B_1^2 - 4B_2}}{2};$$

$$E_1 = \frac{A_2}{s_1s_2}; \quad E_2 = \frac{-(E_1s_2 + A_1)}{s_2 - s_1}; \quad E_3 = -(E_1 + E_2).$$

Для данного случая качество переходного процесса будем оценивать только временем регулирования [1]. При этом время регулирования ($t_{\text{рег}}$), или время переходного процесса, определяется промежутком времени от момента приложения воздействия до момента, когда

величина $|\omega(t) - \omega_{yc}|$ становится во все последующие моменты времени меньше некоторого значения Δ . Анализ выражения (5) показывает, что если корни характеристического уравнения автомобиля действительные и отрицательные, то с увеличением времени значение угловой скорости поворота машины будет стремиться к величине E_1 , равной по смыслу величине установившейся угловой скорости (ω_{yc}) после завершения переходного процесса.

На рис. 3 в качестве примера изображены графики изменения угловой скорости поворота ГАЗ 3302 (снаряженная масса) при мгновенном изменении угла поворота управляемых колес с 0 до 0.17 радиан на различных скоростях, меньших V_0 .

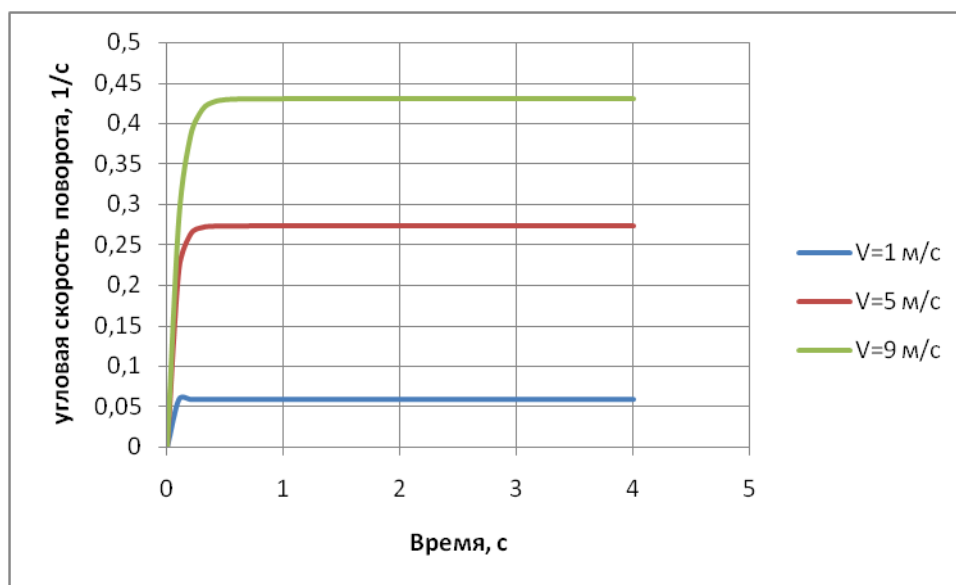


Рис. 3. Аперриодический характер протекания переходного процесса

Теперь разберем ситуацию, когда выполняется условие $V_0 < V \leq 32$ м/с. В данном случае переходная реакция автомобиля имеет колебательный характер и определяется:

$$\omega(t) = T_1 + Z e^{-\frac{B_1}{2}t} \sin(\omega_k t) + T_2 e^{-\frac{B_1}{2}t} \cos(\omega_k t), \tag{6}$$

где $\omega_k^2 = B_2 - \left(\frac{B_1}{2}\right)^2$; $T_1 = \frac{A_2}{B_2}$; $T_2 = -T_1$; $T_3 = A_1 - B_1 T_1$; $Z = -\frac{T_2}{\omega_k} \left(\frac{B_1}{2} - \frac{T_3}{T_2}\right)$.

На рис. 4 в качестве примера изображены графики изменения угловой скорости поворота ГАЗ 3302 (снаряженная масса) при мгновенном изменении угла поворота управляемых колес с 0 до 0.17 радиан на различных скоростях, больших V_0 .

Для исследования переходной реакции автомобиля удобно представить выражение (6) в следующем виде:

$$\omega(t) = T_1 + T_4 e^{-\frac{B_1}{2}t} \sin(\omega_k t + \varphi_k). \tag{7}$$

При этом необходимо исследовать два варианта, а именно:

$Z < 0$, тогда будем иметь: $T_4 = -\sqrt{T_2^2 + Z^2}$; $\varphi_k = -\arcsin\left(\frac{T_2}{\sqrt{T_2^2 + Z^2}}\right)$;

$$Z > 0, \text{ тогда получим: } T_4 = \sqrt{T_2^2 + Z^2}; \quad \varphi_k = \arcsin\left(\frac{T_2}{\sqrt{T_2^2 + Z^2}}\right).$$

Так же, как и для V_0 , формула (8) определяет значение поступательной скорости V_1 , при которой величина Z обращается в нуль, учитывая, что положение центра тяжести автомобиля, его масса и момент инерции остаются постоянными. Имеем:

$$V_1 = \sqrt{\frac{R_1 - 2R_5}{2R_4}}, \quad (8)$$

$$\text{где } R_4 = \frac{-aC_1(aC_1 - bC_2)M}{J_z(a+b)C_1C_2}; \quad R_5 = \frac{-aC_1(a+b)}{J_z}.$$

Зная величину V_1 , необходимо для соответствующего интервала скоростей применять нужные выражения для T_4 и φ_k .

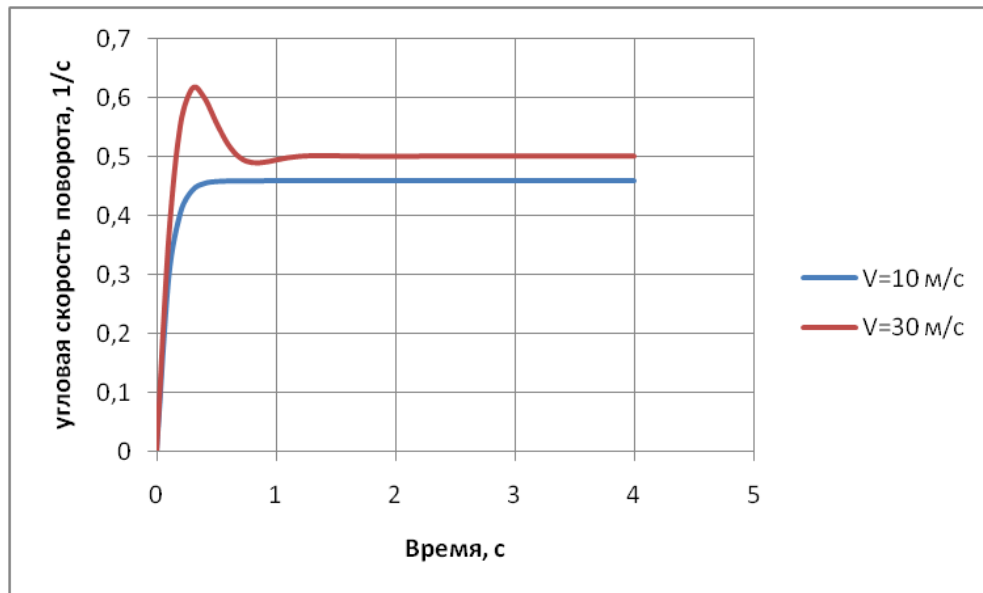


Рис. 4. Гармонический характер протекания переходного процесса

Теперь перейдем к проведению прямых оценок качества переходной реакции угловой скорости поворота автомобиля. При протекании переходного процесса по гармоническому закону большой практический интерес представляют следующие прямые оценки качества [1], такие как: время переходного процесса или время регулирования ($t_{\text{пер}}$); перерегулирование σ , численно равное в процентном отношении $\sigma = \frac{\omega_{\text{max}} - \omega_{\text{yc}}}{\omega_{\text{yc}}} \cdot 100\%$; число колебаний за время переходного процесса n .

Для определения времени переходного процесса необходимо учесть, что при $t > t_{\text{пер}}$ выполнялось условие $|\omega(t) - \omega_{\text{yc}}| < \Delta$. В нашей работе за величину Δ принимается значение, составляющее 10% от установившейся угловой скорости поворота автомобиля, равное $\Delta = \frac{1}{10} \omega_{\text{yc}} = \frac{1}{10} T_1$, либо равное $\frac{1}{10} E_1$, в зависимости от характера процесса. С учетом данных уточнений, нами были произведены подсчеты величины времени переходного процесса

при различных значениях V и фиксированных M и θ_{yc} . На рис. 5 и рис. 6 изображены графики изменения времени переходного процесса в зависимости от постоянной поступательной скорости автомобиля для случаев, когда $M=1850$ кг, $M=2500$ кг, $M=3000$ кг и $M=3500$ кг при $\theta_{yc}=0.17$ рад.

На рис. 5 видно, что на начальном участке графиков время переходного периода практически линейно зависит от скорости V и увеличивается с ростом скорости. Затем в интервале скоростей примерно от 10 до 23.8 м/с время регулирования практически не изменяется, после чего скачком возрастает более чем в два раза. На рис. 6 также на начальном этапе отмечается практически линейная зависимость времени регулирования от скорости V , затем без скачка, но более не линейно возрастает при увеличении скорости.

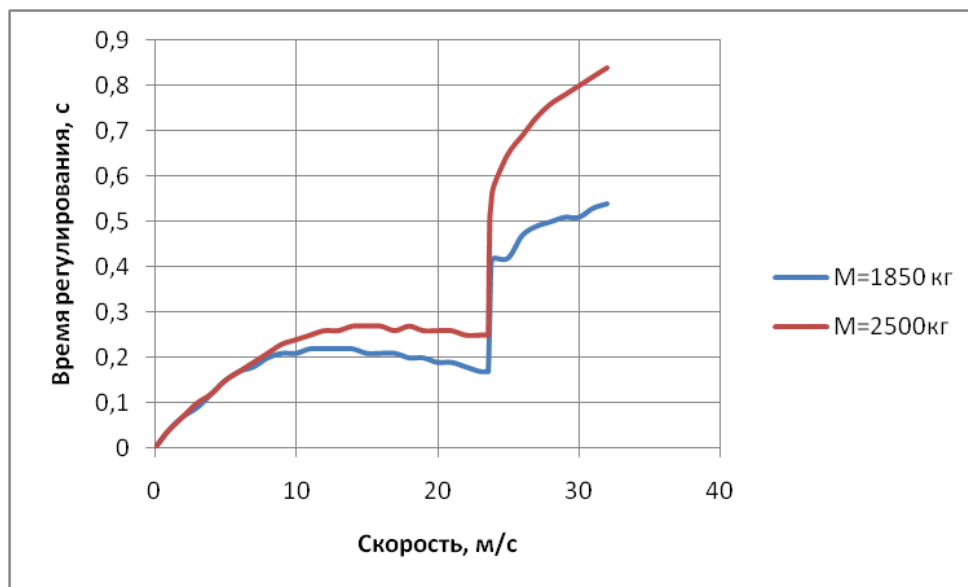


Рис. 5. Зависимость времени регулирования от скорости

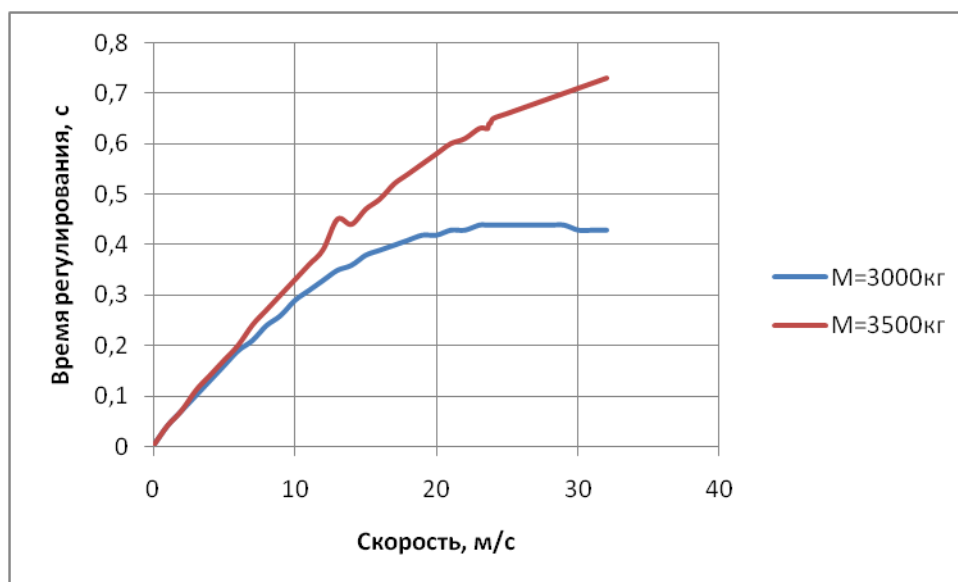


Рис. 6. Зависимость времени регулирования от скорости

Сравнивая рис. 5 и рис. 6, можно констатировать, что максимальные величины времени переходного процесса автомобиля при ступенчатом управляющем воздействии отмечаются на скорости 32 м/с. Их значения составляют 0.54 с ($M=1850$ кг), 0.84 с ($M=2500$ кг), 0.43 с ($M=3000$ кг) и 0.73 с ($M=3500$ кг). На основании этих данных можно предположить,

что максимальная величина времени регулирования будет наступать при массе ГАЗ 3302 (равномерное нагружение), находящейся в интервале от 2500 до 3000 кг и иметь значение больше 0.84 с.

При подсчетах значений времени переходного процесса изменение угла поворота управляемых колес не влияет на их величину, т.е. время регулирования не зависит от выше-названного угла.

Далее определим величину перерегулирования в процентном отношении, используя формулу:

$$\sigma = \frac{\omega_{\max} - \omega_{\text{ус}}}{\omega_{\text{ус}}} \cdot 100\%, \quad (9)$$

где $\omega_{\text{ус}} = T_1$; $\omega_{\max} = \omega(t_1)$, величина t_1 подставляется в выражение (7);

$$t_1 = \frac{\arctg\left(\frac{2\omega_k}{B_1}\right) + \pi - \varphi_k}{\omega_k}, \text{ при } Z < 0;$$

$$t_1 = \frac{\arctg\left(\frac{2\omega_k}{B_1}\right) - \varphi_k}{\omega_k}, \text{ при } Z > 0.$$

Строим графики зависимости величины перерегулирования для тех же условий, что и при исследовании времени переходного процесса.

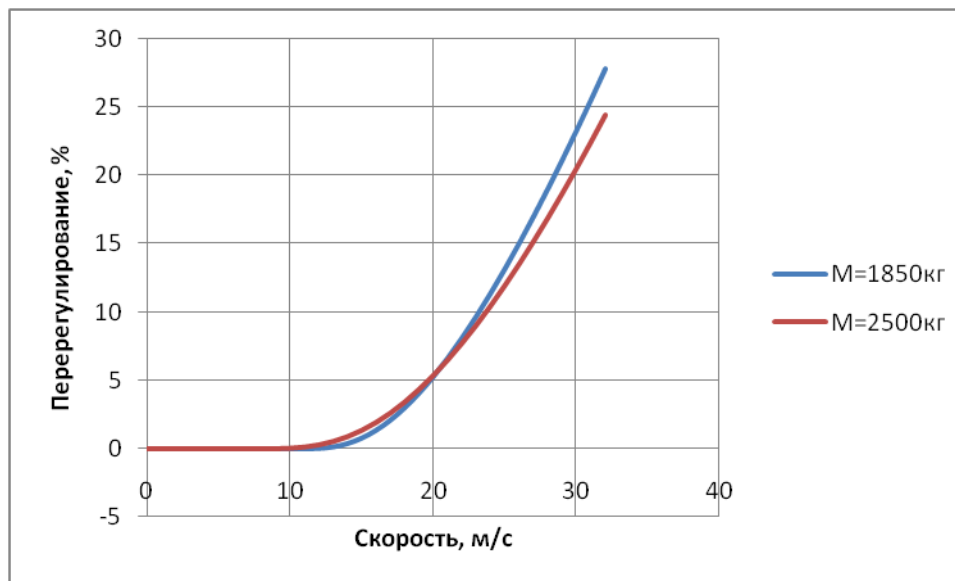


Рис. 7. Зависимость перерегулирования от скорости

Анализируя график, изображенный на рис. 7, можно сделать вывод, что при скоростях, на которых переходная реакция движения автомобиля протекает по колебательному закону, значения перерегулирования возрастают с увеличением скорости и достигают существенных значений, равных 28% и 25% при массах 1 850 кг и 2 500 кг соответственно. С другой стороны, при изменении массы от 1 850 до 2500 кг величина перерегулирования (заброса) на максимальной поступательной скорости, предусмотренной для ГАЗ 3302, существенно не изменяется.

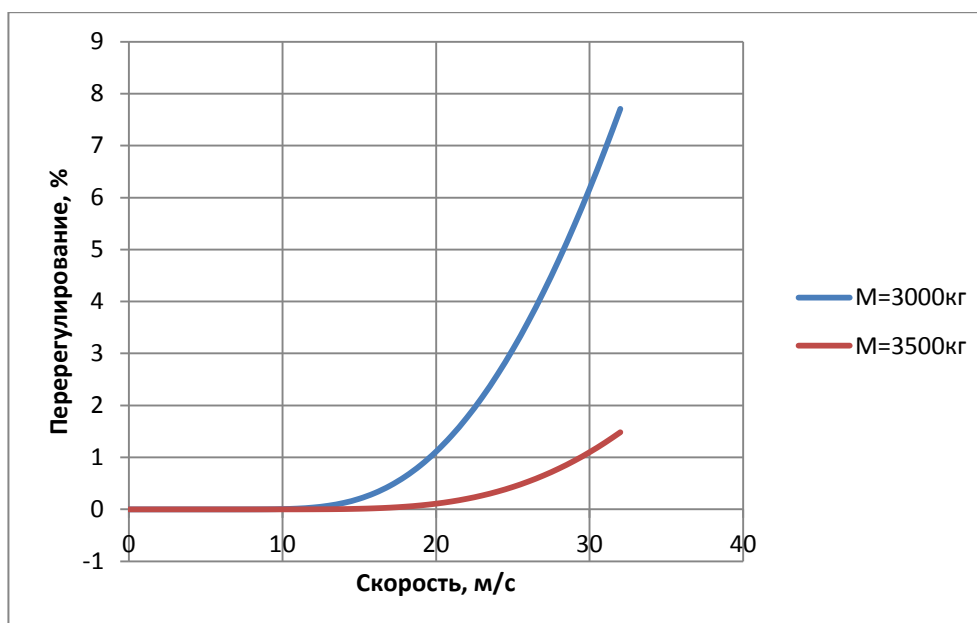


Рис. 8. Зависимость перерегулирования от скорости

Ход графиков, изображенных на рис. 8, аналогичный с предыдущими, показанными на рис. 7, за исключением небольших величин перерегулирования. При полной массе данное значение на скорости, равной 32 м/с, составляет небольшую величину, равную 1.5%.

Что же касается числа колебаний за время переходного процесса, то в нашем случае при изменении параметров внутри указанных диапазонов масс автомобиля, его поступательной скорости и угла поворота управляемых колес, эта величина не превышает значения 0.5.

В конце работы необходимо отметить, *во-первых*, что величина угла поворота управляемых колес не влияет на закон изменения угловой скорости поворота автомобиля при переходном процессе, возникающем из-за приложенного скачкообразного управляющего воздействия, а также, принимая во внимание формулы для определения коэффициентов, входящих в выражения (5) и (6), не влияет на время регулирования и величину заброса; *во-вторых*, что по совокупности показателей качества переходного процесса, можно отметить диапазон масс автомобиля ГАЗ 3302, в котором наблюдается значительное время регулирования (переходного процесса) при достаточно больших значениях перерегулирования (забросов). Данный диапазон составляет значения от 2500 до 3000 кг, при условии равномерного распределения груза в кузове машины. Причем, по нашему мнению, должна существовать оптимальная величина массы из этого диапазона, при которой существует максимальное значение времени регулирования и имеется значительный заброс угловой скорости поворота автомобиля при наложении ступенчатого управляющего воздействия. Другими словами, та масса, при которой наблюдается наиболее худшая управляемость ГАЗ 3302, как чисто механической системы, так как с позиций управляемости необходимо стремиться к минимальному времени регулирования и минимальным значениям забросов.

Библиографический список

1. **Воронов, А.А.** Основы теории автоматического регулирования и управления: учеб. пособие для вузов / А.А. Воронов, В.К. Титов, Б.Н. Новогранов. – М.: Высш. шк., 1977. – 519 с.
2. **Молев, Ю.И.** Теоретическая оценка влияния установки газобаллонного оборудования на управляемость автобуса ПАЗ 32054 [Электронный ресурс] / Ю.И. Молев, М.Г. Черевастов // Режим доступа: http://transport-systems.ru/1_2017.html (Дата обращения: 19.03.2018).
3. **Молев, Ю.И.** Теоретический расчет переходной реакции движения автомобиля при заданной функции возмущения / Ю.И. Молев, М.Г. Черевастов // Организация и безопасность дорожно-

- го движения: материалы XI международной научно-практической конференции (15 марта 2018 г.): в 2 т. / отв. ред. Д. А. Захаров. – Тюмень: ТИУ, 2018. – Т. 2. – С. 89–95.
4. Руководство по эксплуатации 3302 – 3902010 – 20 РЭ. – 2-е изд. – М., 1996.

*Дата поступления
в редакцию 01.06.2018*

U.Sh. Vakhidov¹, Y.I. Molev¹, M.G.Cherevastov², A.V.Sogin¹, A.S., Slyusarev³

DIRECT ASSESSMENTS OF THE QUALITY OF THE MOTOR VEHICLE REACTION ON STEP-MANAGED IMPACT

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev¹,
Nizhny Novgorod state pedagogical university of a name of Kozma Minin²,
Volga state university of water transport (N. Novgorod)³

Purpose: The formation of new approaches to the assessment of vehicle safety, at the stage of operation, after changes in their design.

Design/methodology/approach: The transient response of the car model GAZ 3302 with a step control action on the steering is studied. The car is represented by a one-mass flat design model. The equations of motion of the machine are written in the form of derivatives of stability. Conditions are investigated for the occurrence of various laws of flow transient response. Calculation is made of direct estimates of the quality of the transition process on the angular velocity of the car at a stepwise (step) control action. In conclusion, the conclusions are obtained about the influence of different design parameters of the car on the quality of the transient response.

Findings: The obtained calculations allow us to estimate the degree of influence of the vehicle's design change on parameters road safety, in terms of changes in its steering.

Research limitations/implications: This study is a starting point for further research in the field of improving the safety of vehicles, the design of which has been modified during the operation phase.

Originality/value: The value of this study is that the calculations of the quality of control of the car GAZ 3302, with various changes in its design (the simulated change in the weight of the car on the axes) are published for the first time.

Key words: vehicle controllability, transient process quality indicators.